

# 基于激光加工机器人的光内送粉变基面熔覆研究

朱刚贤 石世宏 傅戈雁 史建军 杨 轶 孟伟栋 姜付兵

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

**摘要** 现有激光熔覆技术大多是基于水平基面上开展的,这种方式极大地限制了激光熔覆技术的广泛应用。基于“光束中空、光内送粉”技术,通过对激光加工机器人系统的程序控制实现了基板 $0^{\circ}\sim 150^{\circ}$ 的倾斜和熔覆头相应姿态的连续变化,研究了基板不同倾斜角度下对熔覆层截面尺寸及组织的影响规律,并对变基面过程中的熔池进行了受力分析。实验结果表明:随基板倾斜角度逐渐增大,粉末聚焦特性变差,进入熔池的粉末量逐渐减少,造成熔覆层高度逐渐降低。熔覆层宽度稳定在光斑左右,变化不明显;偏移量(熔覆层最高点轴线位置偏离激光束轴线位置间的距离)先增大后降低。熔覆层顶部显微组织树枝晶大小先变粗后变细,典型柱状晶生长方向随基板角度变化也发生相应的倾斜。该工艺为在非水平基面上进行激光熔覆、修复及成形提供了参考价值。

**关键词** 激光技术;激光熔覆;机器人;变基面;截面尺寸;微观组织

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0303010

## Research on Variable Reference Plane Cladding Based on Laser Processing Robot with Inside-Laser Powder Feeding

Zhu Gangxian Shi Shihong Fu Geyan Shi Jianjun Yang Shi

Meng Weidong Jiang Fubing

*School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China*

**Abstract** Laser cladding technology is based on horizontal reference plane at present, however, this way greatly limits its extensive applications. The substrate inclined angle of  $0^{\circ}\sim 150^{\circ}$  and continuously variable postures of coaxial powder nozzle have been achieved by changing the programming to control the laser processing robot adopting the technology of “hollow laser beam and interal powder feeding”. The influence rules of the substrate inclined angle on the section size and microstructure of cladding layers are investigated, and the force of molten pool is analyzed during varging the inclined angles of the substrate. The experimental results show that the powder converging behavior becomes worse with the increase of the substrate inclined angle, because reducing of powder volume into molten pool leads to decreases of the cladding layers' height. The width of cladding layers do not show significant variations and offset first increase and then decrease. The dendrite size of the cladding layers' top microstructure first becomes thick and then thin gradually and the growth direction of typical columnar crystal tilts with the substrate inclined angle. The process basis is provided for laser cladding, repairing and forming on variable reference plane by the inside-laser powder feeding way.

**Key words** laser technique; laser cladding; robot; variable reference plane; section size; microstructure

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900

## 1 引 言

激光熔覆技术由于具有冷却速度快、涂层稀释率低、变形小、粉末选择几乎没有限制、熔覆层的厚度可

收稿日期: 2014-09-26; 收到修改稿日期: 2014-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(51405319、61475107)、江苏省自然科学基金(BK2012183)和江苏省高校自然科学基金(12KJB4600008)

作者简介: 朱刚贤(1980—),男,博士,副教授,主要从事激光快速成形及数值模拟等方面的研究。

E-mail: gxzhu@suda.edu.cn

控范围大和工艺过程易于实现自动化等优异特征,可显著改善基体表面耐磨、耐蚀、耐热及抗氧化等特性而得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。现有技术大多是基于水平基面加工的,即熔覆头或喷粉头始终保持垂直位置在水平基面上进行加工<sup>[4-5]</sup>,而对于不便搬运和不便摆平的大型火电站、核电站、轮船、石化和航空航天行业的装备、结构件、零部件的表面则很难进行熔覆和修复加工<sup>[6]</sup>。为进一步拓宽激光熔覆技术的应用,国内外研究学者对在非水平基面上进行熔覆也进行了积极的探索。台湾成功大学 Lin 等<sup>[7]</sup>在熔覆头始终垂直情况下,理论研究了基板倾斜角度对粉末浓度分布及激光束光强分布的影响,结合实验获得了基板倾斜角度对熔覆层截面轮廓形貌的影响规律。德国弗劳恩霍夫材料和光束技术研究所 Nowotny 等<sup>[8]</sup>及天津工业大学杨洗陈等<sup>[9]</sup>分别采用了一套基于机器人的三维成形系统,可实现熔覆头小角度偏摆的三维熔覆。印度激光材料加工中心 Paul 等<sup>[10]</sup>设计了专用熔覆头,实验研究了在垂直基面或立面上工艺参数对熔覆层截面尺寸的影响规律,建立了立面下熔覆层尺寸及相对中心位置的位移偏移距离的理论模型,实现了在垂直面或立面上的激光熔覆。清华大学何金江等<sup>[11]</sup>研制了垂直送粉喷嘴和垂直面送粉强化系统,可适合内外侧垂直面的激光熔覆。

以上研究均是基于基板小角度倾斜或垂直位置时所进行的激光熔覆,而对于非水平面的基板大角度(大于 $90^\circ$ )倾斜时,在其基面上的激光表面熔覆则很少报道。本文基于激光加工机器人技术采用课题组开发的“光内送粉”喷嘴<sup>[12]</sup>实验研究了基板不同倾斜角度对熔覆层尺寸、偏移量(熔覆层最高点轴线位置偏离激光束轴线位置间的距离)和金相组织的影响规律,结合对变基面过程中的熔池的受力及粉末聚焦状态对实验结果进行了解释,该工艺为在非水平基面上进行激光熔覆、修复及成形提供参考价值。

## 2 实验材料与方法

实验用金属粉末:Fe313,粉末粒度:45~74  $\mu\text{m}$ ,其化学成分(质量分数,%)为:0.1C,2.5~3.5Si,13~17Cr,0.5~1.5B,余量为Fe;基材为304不锈钢,其化学成分(质量分数,%)为:0.08C,0.96Si,1.85Mn,0.029P,0.027S,17.31Cr,8.01Ni,余量为Fe,几何尺寸:150 mm $\times$ 100 mm $\times$ 10 mm。实验装置由2 kW 光纤激光器、6轴 Kuka 机器人,可倾式旋转工作台、光内同轴送粉喷嘴、送粉器及辅助装置组成。具体实验装置如图1所示。

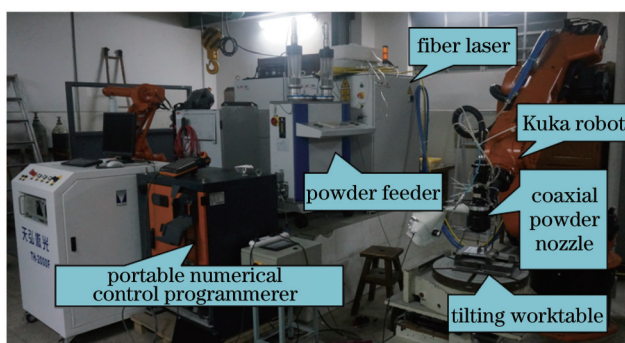


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

实验前,金属粉末进行烘干以增强流动性,基板经过砂纸打磨后再用乙醇、丙酮清洗去除油脂与污渍,单道熔覆实验长度为40 mm。实验过程中,将基板固定在可倾式旋转工作台上,当给定基板一个倾斜角度,通过编程相应调整机器人手臂使同轴送粉喷嘴始终与基板垂直,基板倾斜角度及调整的典型角度如图2所示。实验后将成形试样沿垂直于扫描方向线切割,将横截面打磨抛光腐蚀处理后,在LEICA DM IRM型光学显微镜及HITACHI S-4700型扫描电镜(SEM)下观察其组织形态,获得基板倾斜角度 $\theta=90^\circ$ 的截面如图3(a)所示,对熔覆层截面的高度 $h_{\max}$ 、宽度 $w$ 及偏移量 $x$ (熔覆层最高点轴线位置偏离激光束轴线的距离)进行测量,具体测量参数如图4所示。图4(a)和(b)是在重力作用下 $x-z$ 平面上 $t=0$ 时熔池截面形貌示意图和 $t=2r/v$ ( $r$ 为激光束半径, $v$ 为激光扫描速度)时熔池截面形貌示意图。为了对比研究基板倾斜角度对熔覆层截面显微组织的影响规律,选取每一个角度下熔覆层最高点处的显微组织进行观察,选取位置如图3(a)所示,所对应位置处的显微组织SEM照片如图3(b)所示。实验工艺参数如表1所示。

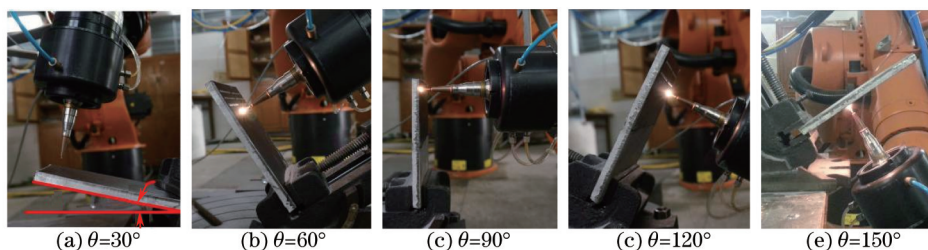


图2 基板倾斜角度典型图

Fig.2 Representative diagram of the substrate inclined angle

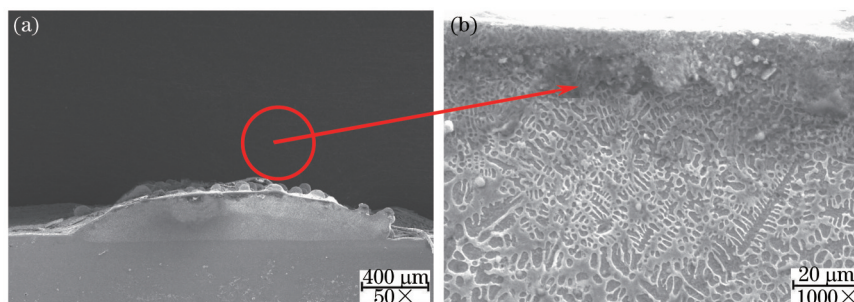


图3 基板倾斜角度  $\theta = 90^\circ$  时熔覆层横截面形貌。(a) 整体; (b) 局部

Fig.3 Section profile of cladding layer with  $\theta = 90^\circ$ . (a) Whole; (b) local

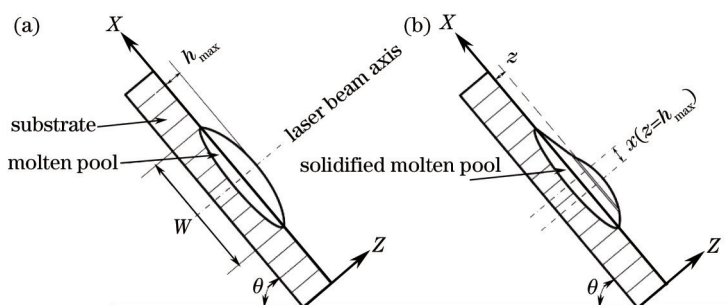


图4 倾斜基板单道熔覆截面形貌示意图。(a)  $t=0$ ; (b)  $t=2r/v$

Fig.4 Schematic diagram of deposited clad profile of the substrate inclined angle. (a)  $t=0$ ; (b)  $t=2r/v$

表1 激光熔覆实验工艺参数

Table 1 Process parameters of laser cladding

Laser power /W	Powder mass flow rate /(g/min)	Laser defocusing distance /mm	Scanning speed /(mm/s)	Carrier gas flow rate /(L/min)	Shielding gas pressure /MPa
600	8	-4	5	3	0.2

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 基板倾斜角度对熔覆层截面尺寸的影响规律

在表1工艺参数下,将基板倾斜角度在 $0^\circ \sim 150^\circ$ 之间,每间隔 $15^\circ$ 进行熔覆,将获得的截面试样放在金相显微镜及扫描电镜下观察测量出单层熔覆宽度 $w$ 、单层熔覆高度 $h_{\max}$ 及偏移量 $x$ ,具体结果分别如图5(a)~(c)所示。

由图5可以看出,随基板倾斜角度增大,单层熔覆高度逐渐降低;单层熔覆宽度变化不大,几乎稳定在激光光斑 $2.0\text{ mm}$ 左右;熔覆层最高点轴线位置相对于激光轴线的偏移量较小,均在 $0.06\text{ mm}$ 以下,但还是可以看出偏移量先增大后逐渐降低的趋势。

有研究<sup>[13-14]</sup>表明单层熔覆宽度主要由激光光斑直径、扫描速度及激光功率共同决定。在基板倾斜过程中,激光束及熔覆头装配部分在机器人控制下实时调整始终保持与基板垂直,激光功率、光斑直径和扫描速度保持不变,所以熔覆层宽度几乎不变,如图5(a)所示。同样,影响单层熔覆高度的关键因素是进入熔池的



粉末量、扫描速度、粉末汇聚直径及熔池宽度<sup>[14-15]</sup>。在扫描速度及熔池宽度稳定情况下,单层熔覆高度随粉末量增多而增大,随粉末汇聚直径增大而减小。

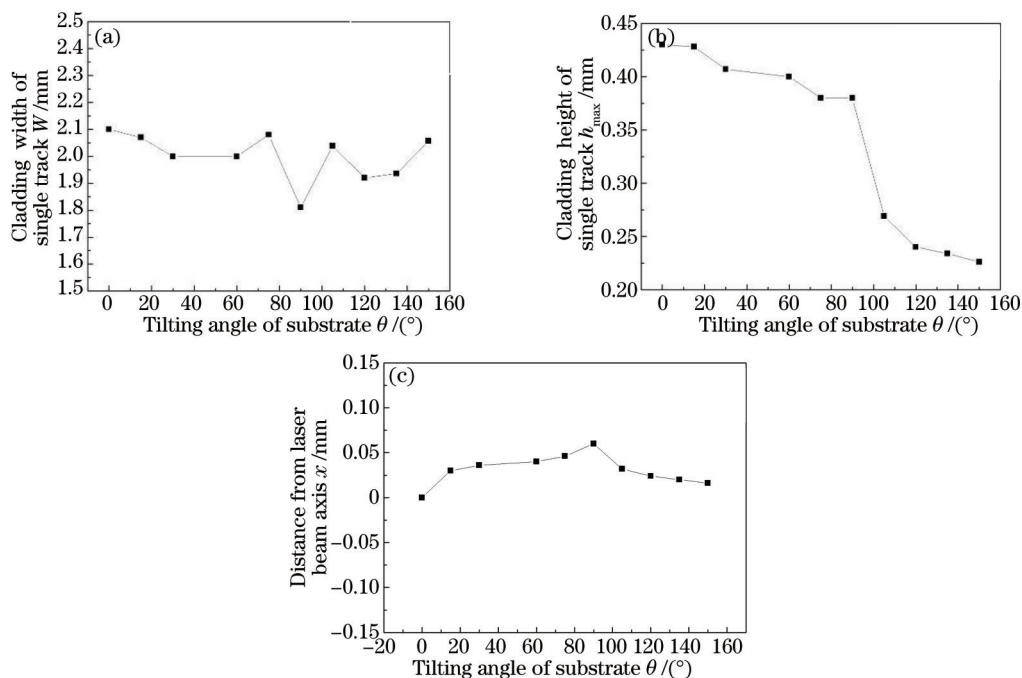


图5 基板倾斜角度对熔覆层尺寸的影响。(a) 熔覆层宽度; (b) 熔覆层高度; (c) 偏移量

Fig.5 Cladding layer sizes with different inclined angles of the substrate. (a) Width of cladding layer; (b) height of cladding layer; (c) offset of cladding layer

为观察粉末颗粒汇聚状态,采用加拿大Qimaging公司生产的MicroPublisher 5 RTV型高速摄像机对基板不同倾斜角度下粉末的流场进行拍摄,对拍摄出的图片进行图像处理,可获得距离喷嘴出口任意位置处的粉末聚焦直径,具体方法参考文献[16],选取 $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=30^\circ$ ,  $\theta=90^\circ$ 和 $\theta=120^\circ$ 时粉末聚焦情况进行分析,拍摄结果如图6所示。取距离喷嘴出口10 mm处的粉末聚焦直径进行对比,测量结果如表2所示。

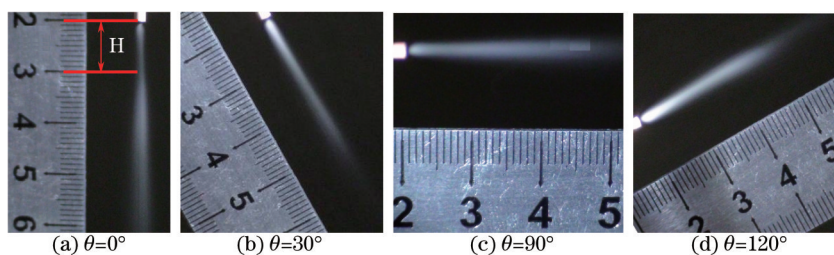


图6 基板倾斜角度对粉末汇聚特性的影响

Fig.6 Powder converging characteristic with different inclined angles of the substrate

表2 在距离喷嘴出口10 mm处基板不同倾斜角度下的粉末聚焦直径

Table 2 Powder focussing diameter with different inclined angles of the substrate at 10 mm away from the nozzle

Substrate inclined angle $\theta/^\circ$	Focussing diameter $d/mm$
0	1.56
30	2.61
90	2.76
120	3.37

由图6及表2可看出,在基板倾斜过程中,粉末颗粒在传输过程中由于受重力的影响,粉末汇聚直径逐渐变大,在熔池一定条件下进入熔池的粉末量减少,造成熔覆层高度逐渐降低,出现了如图5(b)所示的情形。

在激光熔覆过程中,熔池的流动由熔池内部所受的力行为决定。由文献[10]可知,在基板倾斜过程中,

熔池主要受重力  $G$ 、表面张力  $F_r$  和粘性力  $F_\mu$  等共同作用。任选熔覆层高度  $z=h$  位置的微小截面,结合文献[8]中的受力平衡,引入基板倾斜角度  $\theta$ ,可得在切线方向上的受力为

$$F_\mu + F_r = G \sin \theta . \quad (1)$$

可看出,随基板倾斜角度  $\theta$  增加,重力分量  $G \sin \theta$  先增大后降低,造成偏移量先增大后降低。同时为了提高实验装置中的光内同轴送粉喷嘴的粉末汇聚特性,在送粉管的外围加了与粉嘴同轴的保护气压力  $F_p$ <sup>[16]</sup>。由于保护气对熔池的压力均匀分布在熔池的表面,相对于熔池的中心线对称,且与基板表面垂直,所以可以认为保护气压力对熔池的影响主要体现为粘性力  $F_\mu$  的增加。所以在保护气压力作用的条件下会对重力对熔池流动的作用产生一定影响,会抵消一部分重力对熔池流动带来的影响,出现整体偏移量不是很大,均在 0.06 mm 以下,就出现如图 5(c)所示的结果。

### 3.2 基板倾斜角度对熔覆层金相组织的影响规律

同理,为了进一步研究基板倾斜过程中重力对熔覆层截面微观组织的影响规律,取每一基板倾斜角度获得熔覆层截面高度  $z=h_{\max}$  处的顶部金相组织进行观察。基板倾斜角度  $\theta=30^\circ$ ,  $\theta=60^\circ$ ,  $\theta=90^\circ$ ,  $\theta=120^\circ$  和  $\theta=150^\circ$  的金相组织的 SEM 照片分别如图 7(a)、(b)、图 3(b)、图 7 (c)、(d)所示。

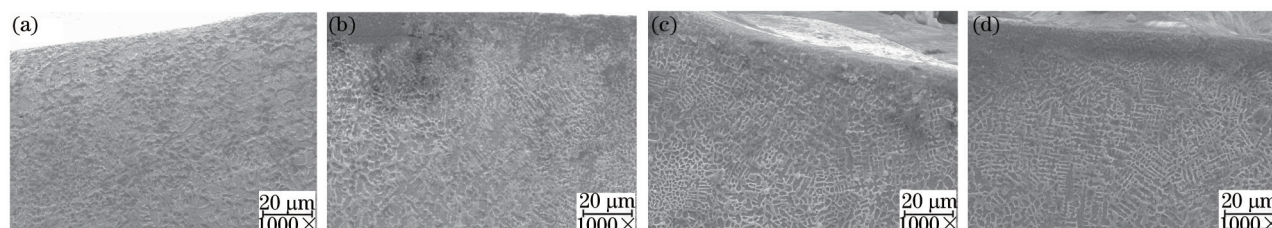


图 7 基板倾斜角度对熔覆层顶端金相组织的影响规律。(a)  $\theta=30^\circ$ ; (b)  $\theta=60^\circ$ ; (c)  $\theta=120^\circ$ ; (d)  $\theta=150^\circ$

Fig.7 Top microstructures of cladding layers with different inclined angles of the substrate. (a)  $\theta=30^\circ$ ; (b)  $\theta=60^\circ$ ;

(c)  $\theta=120^\circ$ ; (d)  $\theta=150^\circ$

对比分析图 3(b)及图 7,可看出随基板倾斜角度逐渐增大,熔覆层顶部显微组织树枝晶大小先由细逐渐变粗,后逐渐变细。典型柱状晶生长方向随基板角度变化也发生相应的倾斜。由于基体是个无限大的散热面,通常熔覆层组织直接从基板外延生长,熔池散热方向朝向基体方向。当基板水平或基板倾斜角度较小时,熔覆层散热方向与熔池重力方向几乎一致,重力会加速熔池的散热,此时熔池温度梯度最大,形核率最大,所以晶粒最细,如图 7(a)所示。

随基板倾斜角度逐渐增大,熔覆层散热方向与熔池重力方向的夹角逐渐增大,偏移量逐渐增大,重力会加速熔池内部向熔覆层顶部流动的趋势,进而会延长顶部熔覆层组织的凝固时间,冷却速度降低,温度梯度逐渐变小,形核率减小,晶粒相对粗大。当基板倾斜角度大于  $90^\circ$ 时,由于重力对偏移量影响逐渐降低,进而顶部熔覆层组织的凝固时间减小,冷却速度增大,温度梯度增大,形核率增大,晶粒又会逐渐变细。由于散热方向会始终朝向基板方向,所以典型柱状晶组织生长方向随基板角度变化发生相应的倾斜。

## 4 结 论

基于“光束中空、光内送粉”技术,通过对激光加工机器人系统的程序控制实现了基板  $0^\circ\sim 150^\circ$ 的倾斜和熔覆头相应姿态的连续变化,实验研究了基板不同倾斜角度下熔覆层截面尺寸及组织的变化规律。发现随基板倾斜角度增大,粉末汇聚特性变差,单层熔覆高度逐渐降低。单层熔覆宽度稳定在激光光斑左右;熔覆层最高点轴线位置相对于激光轴线的偏移量先增大后逐渐降低,熔覆层顶部显微组织树枝晶大小先由细逐渐变粗,后逐渐变细。典型柱状晶生长方向随基板角度变化也发生相应的倾斜。该工艺为在非水平基面上进行激光熔覆、修复及成形工艺提供参考价值。

### 参 考 文 献

- 1 Weng F, Chen C Z, Yu H J. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review[J]. Mater Design, 2014, 58: 412–425.
- 2 Kusinski J, Kac S, Kopia A, et al.. Laser modification of the materials surface layer—a review paper[J]. Bull Pol Acad Sci Tech Sci,

- 2012, 60(4): 711-728.
- 3 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 296-301.  
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 296-301.
- 4 Wang Xuyue, Wang Yanfei, Jiang Hao, *et al.*. Laser cladding forming of round thin walled parts with slope angle[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0103006.  
王续跃, 王彦飞, 江 豪, 等. 圆形倾斜薄壁件的激光熔覆成形[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103006.
- 5 Yu Lingling, Shi Shihong, Di Keyun. Research on the laser cladding inclined wall accumulation based on the internal laser coaxial powder feeding technology[J]. Laser and Infrared, 2009, 39(3): 264-266.  
郁玲玲, 石世宏, 狄科云. 基于光内同轴送粉技术的激光熔覆斜壁堆积成形研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(3): 264-266.
- 6 Yang Xichen, Li Huishan, Wang Yunshan, *et al.*. Laser refabricating technology for repairing expensive and important equipments[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2003, 40(10): 53-57.  
杨洗陈, 李会山, 王云山, 等. 用于重大装备修复的激光再制造技术[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(10): 53-57.
- 7 Lin J M, Hwang B C. Coaxial laser cladding on an inclined substrate[J]. Opt Laser Technol, 1999, 31(8): 571-578.
- 8 Nowotny S, Scharek S, Beyer E, *et al.*. Laser beam build-up welding: precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition[J]. J Therm Spray Technology, 2007, 16(3): 344-348.
- 9 Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2780-2798.  
杨洗陈. 激光加工机器人技术及工业应用[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2780-2798.
- 10 Paul C P, Mishra S K, Kumar A, *et al.*. Kukreja, laser rapid manufacturing on vertical surfaces: Analytical and experimental studies [J]. Surf Coat Technol, 2013, 224: 18-28.
- 11 He Jinjiang, Zhong Minlin, Liu Wenjin. Investigation on laser modification with powder feeding for vertical surfaces[J]. Applied Laser, 2004, 24(6): 322-326.  
何金江, 钟敏霖, 刘文今. 垂直面送粉激光强化系统与应用研究[J]. 应用激光, 2004, 24(6): 322-326.
- 12 Shi Shihong, Fu Geyan, Wang Anjun, *et al.*. Laser forming manufacturing process and nozzle of inside-laser powder feeding[P]. China Patent: 200610116413.1, 2006-09-22.  
石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头[P]. 中国专利: 200610116413.1, 2006-09-22.
- 13 Liu Jichang. Model of wall thickness of the part formed by single-pass laser cladding[J]. Materials Science and Technology, 2005, 13(1): 99-102.  
刘继常. 激光单道熔覆成形的金属零件壁厚模型的研究[J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(1): 99-102.
- 14 Zhu G X, Li D C, Zhang A F, *et al.*. The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition[J]. Opt Laser Technol, 2012, 44(2): 349-356.
- 15 Liu J C, Li L J. Study on cross-section clad profile in coaxial single-pass cladding with a low-power laser[J]. Opt Laser Technol, 2005, 37(6): 478-482.
- 16 Wang Lifang, Zhu Gangxian, Shi Shihong, *et al.*. Influence of shielding gas pressure on flow field of the inside-laser powder feeding nozzle[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(s1): s103007.  
王丽芳, 朱刚贤, 石世宏, 等. 保护气压力对光内送粉喷嘴粉末流场的影响研究[J]. 中国激光, 2013, 40(s1): s103007.

栏目编辑: 宋梅梅